ロランCシステムの評価－II

南西太平洋における漂泊中の相対精度について

吉村　浩・中根重勝・合田政次

Evaluation of the Loran C System－II
On the Relative Accuracy while the Ship is Drifting in the South Western Pacific Ocean

Hiroshi YOSHIMURA, Shigekatsu NAKANE and Masaji GODA

The authors evaluated the accuracy of the Loran C System based on measurments of the relative positional error which is defined as the difference between the position fixed by this system (9970 chain) and the one fixed by the Navy Navigation Satellite System (NNSS). The NNSS served to give us highly accurate ship's positions, and a number of ships are equipped with its receivers.

The data were collected during the cruises of the T. S. Kakuyo Maru in the south western Pacific Ocean in each autumn for three years, 1979～1981. The measurments were carried ou while the ship was drifting in order to exclude error of NNSS position due to errors in data of the ship's course and speed.

In this observation area the mean relative errors were 0. 72 nautical miles in day time and 1. 12 nautical miles in night time. Within 1500 nautical miles distance from the transmitting station there was a mean relative error of 0. 8 ± 0. 4 nautical miles in night and day. In the distance range of 1500～1700 nautical miles, a standard position was necessary to carry out correction of the slips which arose with the time difference errors. The errors are of the order of 10 μsecs on the machine. When the corrections were carried out appropriately, we were able to fix a suitable position with relative error of less than 1. 7 ± 0. 8 nantical miles.

南西太平洋海域ではロランAシステムが廃止され，現在ではこれに代ってロランCシステムが利用されるようになり，利用範囲が拡大され，精度も向上したとされているが，その評価試験による精度の把握が必要である．洋上における電波航法システムの評価を行う際には，基準とすべき絶対位置が得られないから，他のシステムの位置との相対誤差によって解析しなければならない．

本報では基準位置として衛星航法システム(NNSS)の位置を用いたが，これは連続測位ができないもののその精度は高く，殊に陸上定点では0.1～0.3海里といわれている（1，2，3)．著者等はその精度を確認するため，試験海域附近の陸上定点で評価試験を行い，基礎的な知見を得ている(4)．航走中には，設定針路，速力よりの誤差で精度が低下するから(5)，陸上とほぼ同じ条件となる漂泊中の NNSS 位置を基準として，洋上におけるロランCの測位結果についての評価を行ったので，その結果について報告する．

測　定　方　法

測定は本学部練習船鶴洋丸の1979～1981年の練習航海で，南西太平洋の西カロリン諸島南方海域における旋網漁業実習期間中に行った．前述のように，NNSS

位置は航走中には，設定の針路と速力からの誤差により精度が左右されるので，その影響を最小限にとどめるため漂泊中の測位結果のみを用いた．

測定海域と9970チェーンの配置を Fig. 1 に示す．使用受信機は次の通りである．

NNSS：光電製作所製 SOM—160 型（TOSNAV—703）400MHz 帯1周波受信機　1台．

LORAN：光電製作所製 LR—777 全自動型ロランC専用受信機　1台．

NNSS の測位時刻を完全に予測することはできないので，毎時0分のロランCの到着時間差値と，受信できたすべての NNSS 位置をその都度記録した．測定海域は主局(M)とZ局との基線延長線附近が多く，主としてM局—W局(W)とM局—Y局(Y)のペアを測定したが，一部Z局の南東海域では，M局—Z局(Z)とM局—W局のペアを測定した．
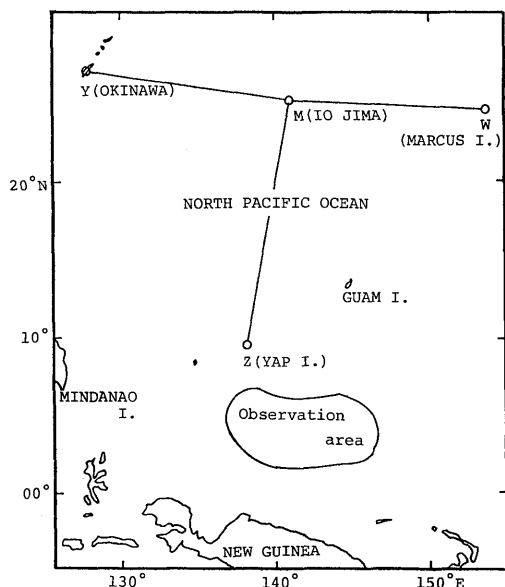
Fig. 1. Arrangement of the Loran C stations, 9970 chain and the observation area.
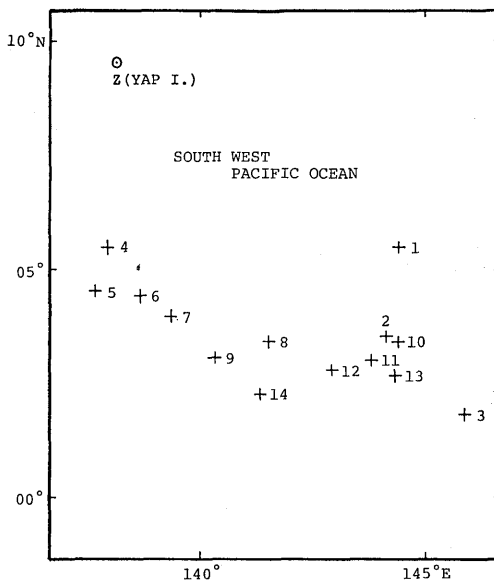
Fig. 2. Sites of the observation zones.

整　　理

NNSS の測位時刻を基準とし，その前後の毎時0分におけるロランCの測定時間差から比例配分によりその時の時間差値を算出した．NNSS の位置をプロットして結べば，ほぼ一直線となり，短時間内に船の圧流される方向と速度はほぼ一定と考えられる．従って NNSS の測位点が隣接する2測点から，前後または左右方向に著しく偏位するものは，測位精度が低いものとして除いた．

測定年別のロランCと NNSS の測定数および NNSS の除去した数を Table 1 に示す．ロランCの時間差が，1時間前または後のものと比較して明らかに10μsec 単位のスリップがあると認められる場合には，修正を行った．修正量は通常 ±10〜30μsec であるが，それが変動し規則性が認められないのは受信機が信号を捕捉できない状態と考えられ，また ±40〜60 μsec

Table 1. The Loran C Fixes by W-Y and W-Z pairs and the NNSS Fixes in each year.

Odserved year	No. of C-Fixes		No. of NNSS-Fixes		
	W-Y	W-Z	Usual	Unusual	Total
1979	17	12	14	2	16
1980	29	32	30	3	33
1981	278		151	16	167
Total	324	44	195	21	216

になるものは受信機のリセットミスと考えられるので，精度を論ずるのに適当でないからこれらを除外した．

NNSS の良好と認められるデータは195個で，これに対応するロランCデータはWZペア25個，WYペア170個である．NNSS 受信時刻におけるロランC位置をロランCテーブルから算出し，NNSS 位置を基準として変緯，東西距および距離を求めた．更に距離の平均値と標準偏差から 3σ 法による棄却を行った．日出没時を境としてGMT20時30分〜08時30分を昼間，その他を夜間として昼夜別に集計した．

ード判別の可否よりも，測定点と送信局との位置関係による影響の方が大きい，これによって一定の精度を維持できる使用範囲が決まる．従来の可視式受信機では 1μV/m の電界強度で S/N 比が 10dB 以上であれば測定可能とされていたから，電界強度が 1μV/m となる距離は標準出力で放射したとき約1,200〜1,700海里で，限界距離といえる(6)．しかし，局から遠くなるにつれて雑音が増大し地表波が減衰して，信号が雑音の中に埋もれ，ブラウン管上で信号を整合することは非常に難しくなるので，実測では800海里程度であるといわれている(8)．それに対し今回の測定点は1.5〜2倍の距離であるが，使用受信機が「S/N 比が -20dB の状況でも動作すること」を求めている米国のコーストガードの技術基準に合格しているので，利用範囲が拡大され，地表波を測定したものと考えられる．すなわち，ある地点の電界強度を次式(9)

Table 2. Distances between mean receiving positions and transmitting stations.

Zone*	Mean position		Dist. from master(M) and secondary stations (W, Y, Z). (NM)			
	lat.(N)	Long.(E)	M	W	Y	Z
1	05° 32.5′	144° 26.3′	1169.4	1252.0		443.7
2	03 36.0	144 07.6	1282.3	1365.8		503.4
3	02 49.6	145 52.2	1344.4	1370.6		611.2
4	05 29.8	137 55.0	1174.8	1459.0	1384.5	
5	04 36.6	137 39.9	1229.7	1510.4	1428.2	
6	04 26.2	138 41.2	1231.3	1482.9	1461.1	
7	03 58.8	139 23.5	1254.2	1481.8	1503.2	
8	03 26.1	141 29.1	1282.0	1445.0	1587.5	
9	03 04.3	140 24.4	1304.8	1495.9	1578.2	
10	03 26.7	144 28.2	1294.2	1366.2	1676.5	
11	03 01.6	143 51.6	1314.7	1403.7	1678.6	
12	02 47.2	142 57.7	1324.2	1439.2	1663.9	
13	02 40.4	144 19.4	1338.9	1412.3	1711.1	
14	02 10.8	141 20.0	1357.3	1515.5	1650.5	

The transmitting powers of M and W are 1800 KW, and those of Y and Z are 1000 KW.
* see Fig. 1

測定点における信号強度は各局の送信出力のほか，測定点から送信局までの距離に左右される．従って，WZペアの測定点を1〜3の3区域，WYペアのそれを4〜14の11区域に分類し，各区域の中心位置を決め，各局からの大圏距離を求めた．各区域の中心位置と各局からの距離を Table 2 にあらわし，それを図示したものが Fig. 2 である．各区域ごとに昼夜別の変緯，東西距，距離および相対位置誤差を各従局に対する時間差に変換したものと，それぞれの平均値と標準偏差を示したものが Table 3 である．

結果と考察

ロラン位置の精度は個々の位置の線の精度に左右されるが，その要因としては受信機の精度や受信電波のモ

$E = E1 \times \sqrt{P/300}$　E：求める地点の電界強度（dB)．E1：送信出力 300KW で計算した距離に対する電界強度 (dB)．P：送信出力（KW)．

により算出し，大気雑音としては観測例(8)のうちで最大の雑音値，10°N，80°Wの地点で日中46dB，夜間61dB を用いて，S/N 比が-20dB になる距離を求めると，Y，Z局から約1,600海里，W，M局からは約1,700海里となる．大気雑音は地域と季節により変動

Table 3. The mean values and standard deviation of difference of latitude, departure, distance and dμs in each zone.

Pair	Zone*	Day(D) or night(N)	No. of datas	D. lat.(NM)		Dep.(NM)		Dist.(NM)		dμs(W)		dμs(Z or Y)	
				Mean	SD**	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
W−Z	1	T***	5	−0.397	0.135	0.083	0.176	0.440	0.143	0.50	0.64	0.68	0.74
		D	Nil										
		N	5	−0.397	0.135	0.083	0.176	0.440	0.143	0.50	0.64	0.68	0.74
	2	T	8	−1.181	1.229	0.211	0.390	1.653	0.617	1.20	1.29	1.21	2.50
		D	Nil										
		N	8	−1.181	1.229	0.211	0.390	1.653	0.617	1.20	1.29	1.21	2.50
	3	T	12	−0.561	0.540	0.272	0.554	0.917	0.387	0.99	1.69	0.14	2.23
		D	3	−0.640		−0.087		0.840		−0.07		1.37	
		N	9	−0.534	0.557	0.391	0.514	0.943	0.358	1.34	1.53	−0.28	2.38
W−Y	4	T	9	−0.556	0.494	0.001	0.305	0.699	0.368	0.66	1.07	0.21	1.03
		D	2	−0.225		−0.220		0.425		0.00		0.45	
		N	7	−0.653	0.476	0.034	0.284	0.780	0.356	0.86	0.90	0.13	1.04
	5	T	8	−0.551	0.660	−0.104	0.511	0.871	0.435	0.36	1.56	0.54	1.66
		D	1	−0.260		−0.950		0.990		−2.10		3.20	
		N	7	−0.593	0.651	0.016	0.379	0.854	0.433	0.71	1.19	0.16	1.26
	6	T	13	−0.378	0.410	0.110	0.382	0.625	0.279	0.71	1.17	−0.19	1.23
		D	8	−0.503	0.371	−0.109	0.319	0.630	0.328	0.24	1.17	0.58	0.93
		N	5	−0.176	0.387	0.460	0.129	0.616	0.175	1.46	0.68	−1.42	0.34
	7	T	11	−0.735	0.735	0.031	0.498	0.946	0.659	0.79	1.35	0.28	1.63
		D	5	−0.336	0.656	0.032	0.220	0.584	0.499	0.40	0.95	0.06	0.69
		N	6	−1.068	0.622	0.030	0.643	1.248	0.622	1.12	1.53	0.47	2.09
	8	T	5	−1.942	0.567	0.143	0.622	2.043	0.574	1.90	1.66	0.96	2.02
		D	Nil										
		N	5	−1.942	0.567	0.143	0.622	2.043	0.574	1.90	1.66	0.96	2.02
	9	T	6	−0.862	0.913	−0.443	0.703	1.310	0.742	−0.48	2.00	1.72	2.12
		D	3	−0.630		0.172		0.712		1.07		−0.14	
		N	3	−1.092		−1.061		1.910		−2.06		3.60	
	10	T	33	−0.548	0.749	0.211	0.445	0.967	0.409	0.92	1.45	−0.03	1.29
		D	11	−0.390	0.452	0.090	0.538	0.731	0.342	0.48	1.71	0.14	1.42
		N	22	−0.627	0.850	0.271	0.375	1.085	0.388	1.14	1.25	−0.11	1.21
	11	T	23	−0.807	0.912	0.193	0.415	1.144	0.618	1.02	1.53	0.20	1.08
		D	7	−0.510	1.241	−0.020	0.458	0.714	0.120	0.21	1.51	0.44	1.02
		N	16	−0.938	1.055	0.287	0.357	1.332	0.653	1.37	1.40	0.09	1.08
	12	T	31	−0.418	0.685	0.101	0.542	0.837	0.498	0.52	1.57	0.07	1.51
		D	14	−0.454	0.308	−0.134	0.533	0.711	0.319	−0.15	1.48	0.67	1.45
		N	17	−0.388	0.880	0.294	0.468	0.941	0.586	1.06	1.43	−0.43	1.36
	13	T	8	−0.629	0.875	0.219	0.326	0.921	0.681	0.93	1.30	0.00	0.35
		D	Nil										
		N	8	−0.629	0.875	0.219	0.326	0.921	0.681	0.93	1.30	0.00	0.35
	14	T	20	−0.858	1.831	0.133	0.359	1.188	0.403	1.01	1.03	0.18	1.26
		D	4	−0.342		−0.098		1.170		−0.03		0.50	
		N	16	−0.986	0.656	0.191	0.363	1.192	0.391	1.27	0.96	0.10	1.24

The dμs means the time difference converted from the relative error (μsec).
* see Fig. 1
** standard deviation
*** T means the total of D and N.

するが，理論的には本海域内では地表波を受信することが可能である．

Table 2 に示したように，Z局から440〜610海里で確実にその地表波の受信可能な距離内にある本海域では，仮にM局信号が空間波であるとすれば 30μsec 以上の遅延時間が現れ，位置誤差が14海里におよぶはずである．しかしながら，実測の誤差は約2.5海里以下で，時間差値にすれば 5μsec 以下にすぎないので，M局信号も地表波である．同様にW，Y局信号も地表たもので，日没から2〜3時間内に 10μsec の変化があらわれ日出前後に回復するパターンが多い．WYペアの区域〔4〜7；Fig. 2〕では一たんスリップしても数時間後には正常に復帰するパターンであったが，その他の区域では各局からの距離はほとんど同じでも〔10〕ではM局信号に，〔11〕ではY局信号にスリップが発生している．すなはち，距離のほかに地理位置や時期による変化のあることを示している．また 30μsec 以上のスリップが発生した場合には，その前後にラン

Table 4. Numbers of the Loran C Fixes and the data of slips occurred in 10 μsec steps.

Pair	Zon*	No. of C-Fixes	No. of non-slipped datas		No. of slipped data every ±10 μsec order.													
					−10 (μs)		+10 (μs)		−20 (μs)		+20 (μs)		−30 (μs)		+30 (μs)		Total	
			W	Z/Y	W	Z/Y	W	Z/Y	W	Z/Y	W	Z/Y	W	Z/Y	W	Z/Y	W	Z/Y
	1	12	12	4		8												8
W−Z	2	14	2	14			12										12	
	3	18		6		12	18										18	12
	4	17	14	17	1		2										3	
	5	15				9	9	6							6		15	15
	6	29	18	20			9	7						2	2		11	9
	7	29	19	5		12	9	12							1		10	24
	8	13	13			13												13
W−Y	9	23	16	2				5				9		7	7		7	21
	10	59	46	45	13	1				13							13	14
	11	38	7	6	21	32	10										31	32
	12	57	51	2			5	35				20	1				6	55
	13	13	13	1		12												12
	14	31	31	16				15										15

* see Fig. 1.
W : M-W in all zones.
Z/Y : M-Z in 1〜3 zones, M-Y in 4〜14 zones.

波であるといえよう．しかし，常に安定した地表波の第1サイクルを測定しているとは限らず，各ペアともスリップを生じている．すなはち，本受信機では各信号の追尾点の設定，信号の検出などの動作はそれぞれ独立して行なわれ（10, 11），S/N 比の低下で信号が雑音の中に埋没すると 10μsec ずつ追尾点をずらして信号検出をするから，測定値に 10μsec 単位のスリップを生ずる．その大きさは信号の埋没領域の大きさに左右され，符号は主従局のどちらのスリップが大きいかによってきまる．

Table 4 にWZおよびWYペアのスリップの状況を分類して示した．WZペアの45測定値の内M—Wで30個，M—Zでも19個のスリップがみられる．M—Zで極性が負となるのは，主局信号で 10μsec スリップしダムな変動がみられ，空間波領域へのスリップで信号の追尾点を設定できない状態であったものと考えられる．一方昼間ではほとんどスリップがみられず，自動受信機ならば1,600〜1,700海里でも充分地表波が受信でき，理論値と一致することを示している．

Table 3 に示した相対誤差は，測定値がスリップしたと判断された場合にはその修正を行った上で位置を求めて算出したものである．すべての区域で変緯の方が東西距より大きくなっているのは，位置の線がいずれも南北方向に近いために誤差の影響が緯度方向により大きくあらわれていることによる．また昼夜別では各区域とも夜間の方が誤差が大きい．その一因として，スリップによりサイクルマッチングを行う位相が異なることが考えられる．

相対位置誤差について，NNSS 位置からの距離をもって考察すると，データの少ない場合の標準偏差（ＳＤ）の信頼性は低いが単に目安として数値を表示したものである．WＺペアとWＹペアを比べると，送信局までの距離はWＺペアの方が近いもののばらつきが大きい．これはM—Ｚの基線延長線に近いことが主因と考えられる．すなはち，時間差の誤差は，Wは各区域で平均値が 0.2μsec 程度の変化で，ＳＤはほぼ等しいのに，ＺはＹより平均値 0.4μsec，ＳＤが 0.7 μsec 大きく，WＺペアの精度を低下させている．WＺペアを測った区域〔1〜3〕では，データ数が少なく断定はできないものの，平均値，ＳＤとも基線延長線に近い方が大きく区域〔1〕，〔3〕，〔2〕の順に増大している．〔2〕と〔3〕では位置の線の交角はともにほぼ 33°で時間差の誤差も大差はないが，〔3〕の 0.′94±0.′36に対し延長線に近い〔2〕では1.′65±0.′62で，その附近のレーン幅の広さが精度低下の要因であることを示唆している．

WYペアを測定した区域〔4〜14〕では，レーン幅はW：0.′31〜0.′35/μsec，Ｙ：0.′30〜0.′39/μsec でほぼ等しく，位置の線の交角は27°〜31°であった．各区域とも経度方向より緯度方向の誤差が大きく，W信号に 1μsec 前後の定偏差があると考えられるが，NNSS 位置の誤差を含むものであるから断定はできない．区域〔7〜9〕では夜間の平均値が大きく（1.′25〜2.′0）昼間の２倍以上に達し，ことに変緯のＳＤも区域によって ±0.′4〜1.′8 となり著しい差異がみられる．

区域〔7〕では〔6〕に対し平均値で 1.5倍，ＳＤは２倍になっており，夜間のみで比べればそれぞれ２〜３倍に増大している．また，スリップは〔6〕では数時間で回復するが，〔7〕では日出時頃まで回復しないこともあわせて，この附近が夜間の利用限界とも云えよう．

区域〔４〜14；Fig. 2〕を局からの距離とスリップの状態などから〔A：４〜６〕，〔B：７〜９〕，〔C：10〜14〕の３つに区分し，まとめて相対誤差を算出したものが Table 5 であり，NNSS 位置を基準にして平均偏位量と 1σ を半経とする誤差円を描いたものが Fig. 4 である．〔A〕では昼夜の差が小さく平均値0.′63と0.′76，ＳＤ 0.′31と0.′36で，１海里以内の誤差であ
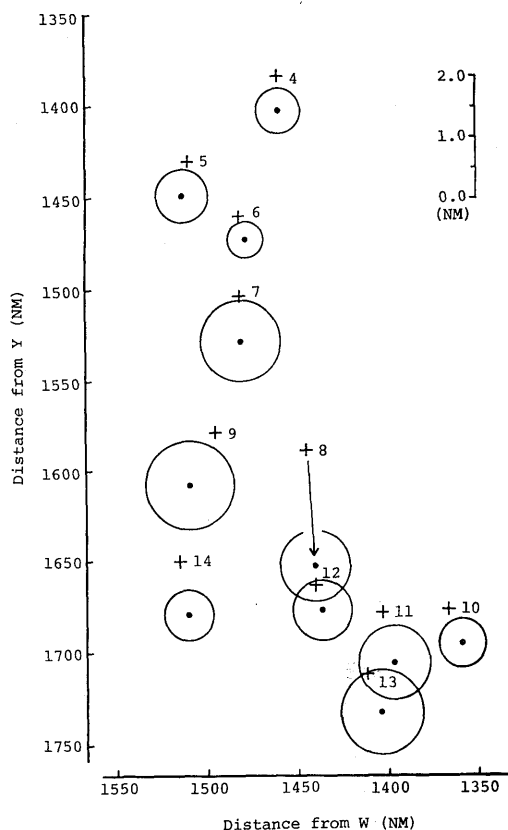
Fig. 3. Mean distances from transmitting stations (W and Y) to each receiving zone, mean positions of total data and the 68％ probability circle in each zone. Each zone number is the same as shown in Table 3. The center of each circle shows the mean calculated Loran C fix by its Tables. The mean NNSS Fix in each zone is shown as symbol (+).
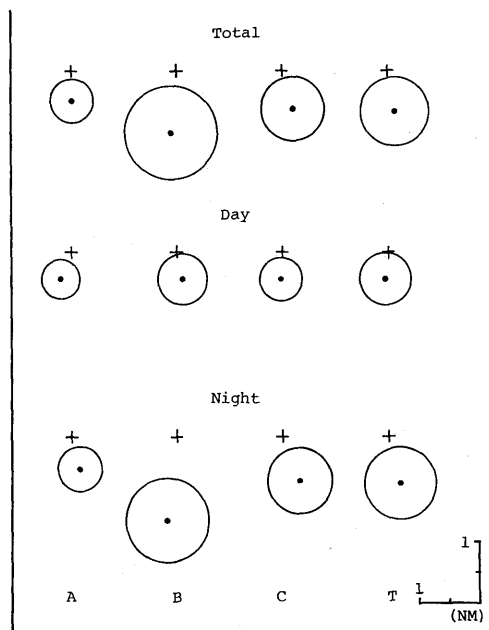
Fig. 4. The 68 ％ probability circle in each area which consists of 3〜5 zones and the mark is the same as shown in Table 5.

Table 5. The mean values and standard deviations of difference of latitude, departure, distance and dμs in each area.

Area	Zone*	Day (D) or Night (N)	No. of data	D. lat. (NM)		Dep. (NM)		Dist. (NM)		dμs (W)		dμs (Y)	
				Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
A	4, 5, 6	T**	30	-0.478	0.498	0.020	0.398	0.713	0.353	0.60	1.22	0.12	1.30
		D	11	-0.432	0.350	-0.187	0.384	0.625	0.312	-0.02	1.28	0.79	1.16
		N	19	-0.505	0.564	0.139	0.353	0.764	0.364	0.96	1.02	-0.27	1.22
B	7, 8, 9	T	22	-1.044	0.900	-0.073	0.635	1.295	0.794	0.69	1.82	0.82	1.96
		D	8	-0.446	0.551	0.085	0.240	0.631	0.408	0.65	0.90	-0.03	0.74
		N	14	-1.386	0.883	-0.164	1.761	1.674	0.707	0.71	2.18	1.31	2.25
C	10, 11, 12, 13, 14	T	115	-0.624	0.810	0.165	0.450	1.003	0.520	0.85	1.44	0.08	1.27
		D	36	-0.433	0.518	-0.039	0.505	0.769	0.348	0.13	1.52	0.44	1.37
		N	79	-0.711	0.899	0.258	0.389	1.109	0.549	1.18	1.28	-0.08	1.19
	Total	T	167	-0.653	0.793	0.107	0.478	0.989	0.563	0.78	1.47	0.19	1.41
		D	55	-0.435	0.495	-0.050	0.459	0.720	0.357	0.17	1.41	0.45	1.27
		N	112	-0.761	0.885	0.185	0.467	1.121	0.598	1.08	1.40	0.06	1.45

The dμs means the time difference converted from the relative error (μsec).
* see Fig. 1
** T means the total of D and N.

る．しかし〔B，C〕では，昼間はいづれも〔A〕とほとんど同程度の誤差であるが，夜間にはともに約1.5倍以上に増大する．従って前述のごとく，〔B，C〕では夜間の利用限界をこえているものと考えられる．

む　す　び

測定海域内における，NNSS位置を基準としたロランC（9970チェーン）位置の平均偏位量は昼間0.′72，夜間1.′12であり，主として緯度方向に偏位する．自動受信機であればY局の地表波の受信可能範囲は約1,700海里におよぶと推定できる．

送信局から1,500海里までは夜間でも0.′8±0.′4の誤差で測位可能であったが，空間状態によってはスリップを生じ，状態が良くなれば回復するものの数時間にわたって継続するので，その発生に対する注意が必要である．1,500海里以上になると昼間になってもスリップが回復しないこともあるので，常にNNSSのような基準となる位置による修正を要する．修正が良好ならば夜間でも1.′7±0.′8以下の誤差で測位可能である．しかし今回の測定でもNNSSの測位回数は1日平均16回，最大時間間隔6時間のこともあり，長時間にわたり基準位置が得られないことがあるから，できるだけ短い時間間隔で測定し，時間差値やロランC位置の急激な変化の発見に努めねばならない．

NNSS位置には，漂泊中といえどもわずかながら誤差を含むことと，航走中は更に大きい誤差が予想されることに対する注意も必要である．

今回の観測では，データ数が充分とは云えず，伝搬モードの判別も不十分であり，10月頃の時期に限られているので，更に測定の積重ねによる評価試験が必要である．

本研究にあたり，測定上の御便宜をいただいた鶴洋丸の船長阿部茂夫教授，測定に御協力下さった同船の乗組員各位と練習生の諸君に深甚の謝意を表する．

引　用　文　献

1）木村小一（1970）．日航海誌，44，81〜90.
2）木村小一・奈須英臣・庄子和民（1974）．航海，42，67〜72.
3）樽美幸雄・和気博嗣・上原　雅（1977）．日航海論集，58，41〜49.
4）吉村　浩・中根重勝・合田政次（1980）．本誌，51，35〜40.
5）木村小一（1971）．日航海誌，46，1〜8.
6）木村小一（1982）．船の科学，35，3，80〜81.
7）海上保安庁灯台部電波標識課（1975）．海技と受験，2月号，30〜34.
8）田口一夫（1973）．海技と受験，7月号，44〜49.
9）田口一夫・松野保久（1968）．鹿大水産学部紀要，17，29〜44.
10）栗村静男（1977）．航海，54，6〜9.
11）光電製作所編（1978）．ロラン受信機LR—777型取扱説明書．光電製作所，東京，18.